


**DECKBLATT**

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
N A A N	NNNNNNNNNN	NNNNNN	NNAAANN	AANNNA	AANN	XAAXX	AA	NNNN	NN
9K	21312.54	-	-	-	-	MRD	RE	0001	00

Titel der Unterlage Bewertung des möglichen Einflusses mikrobiologischer Vorgänge im geplanten Endlager Schachanlage Konrad auf die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden PTB-SE-IB-47 (Februar 1989)	Seite I.
	Stand Feb. 1989
Ersteller PTB	Textnummer lfd. Nr. 254

**Stempelfeld**

PSP-Element TP 2: 21285

zu Plan-Kapitel: 3.9

P

03/03/89

03/03/89

Freigabe für Behörden

Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung der PTB.



# REVISIONSBLATT

Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Funktion	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
9K	21312.54	-	-	-	-	MRD	RE	0001	00

Titel der Unterlage: Bewertung des möglichen Einflusses mikrobiologischer Vorgänge im geplanten Endlager Schachtanlage Konrad auf die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden PTB-SE-IB-47 (Februar 1989)

Seite  
II.

Stand  
*Feb.* 1989  
lfd. Nr. 254

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision
------	--------------------	----------------	-------------------	------------	---------	--------------------------

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur  
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung  
Kategorie S = substantielle Änderung  
Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

PHYSIKALISCH - TECHNISCHE  
BUNDESANSTALT

Abteilung Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle

INTERNER ARBEITSBERICHT



Physikalisch-Technische Bundesanstalt



Chalmers Technische Hochschule  
Göteborg, Schweden

Bewertung des möglichen Einflusses mikrobiologischer  
Vorgänge im geplanten Endlager Schachtanlage Konrad  
auf die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden

Braunschweig, Februar 1989

PTB-SE-IB-47

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Abfälle und Abfallgebinde
3. Vorkommen und Aktivität von Mikroorganismen
  - 3.1 Charakterisierung von Mikroorganismen
  - 3.2 Wachstumsansprüche von Mikroorganismen
4. Mikrobielle Aspekte bei der Herstellung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfallprodukte
5. Mögliche Auswirkungen in der Betriebsphase des Endlagers Konrad
6. Mögliche Auswirkungen in der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad
  - 6.1 Mögliche Auswirkungen im Nahbereich
    - 6.1.1 Randbedingungen im Grubengebäude zu Beginn der Nachbetriebsphase
    - 6.1.2 Bewertung mikrobieller Vorgänge im Nahfeld
  - 6.2 Mögliche Auswirkungen im Fernbereich
    - 6.2.1 Randbedingungen längs des Wasserpfads
    - 6.2.2 Bewertung mikrobieller Vorgänge im Fernbereich
7. Schlußfolgerungen
8. Literaturverzeichnis

## 1. Einleitung

Auf dem 8. Projektgespräch ist vom Niedersächsischen Umweltminister gefordert worden, die PTB möge eine Gesamtbewertung über die Bedeutung von Mikroorganismen im geplanten Endlager Konrad abgeben.

Die nachfolgende Stellungnahme hat daher zum Ziel abzuschätzen, ob möglichen mikrobiellen Vorgängen im Vergleich zu anderen Einflußparametern eine erhöhte Bedeutung für die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden zukommt. Diese Bewertung basiert hauptsächlich auf einer Studie der TH Darmstadt /1/, die im Auftrag des BMFT eine umfangreiche Auswertung der zur o. g. Fragestellung vorliegenden Literatur durchgeführt hat. Weiterhin werden die Ergebnisse eines OECD-NEA-Workshops zu diesem Thema /2/ und einer weiteren Studie der TH Darmstadt zur Frage einer mikrobiellen Aktivität in Abfallprodukten mit organischen Abfällen /3/ mit herangezogen.

Im vorliegenden Bericht wird davon ausgegangen, daß während der Errichtung und des Betriebs eines Endlagers Mikroorganismen auf jeden Fall in das Grubengebäude gelangen. Auch ist nicht von vornherein auszuschließen, daß Mikroorganismen bzw. ihre Dauerformen trotz ungünstiger Lebensbedingungen - verglichen mit denen in der Biosphäre - in den Sediment/Grundwasser-Systemen von Nebengestein und über- bzw. unterlagernden Schichten eines Endlagerbergwerks vorkommen können. In Endlagern ist also grundsätzlich eine mikrobielle Tätigkeit möglich.

Es ist also zu prüfen, ob möglicherweise im Endlager ablaufende mikrobielle Prozesse Auswirkungen haben können, die nicht bereits durch die Ergebnisse der standortspezifischen Sicherheitsanalysen für die Betriebs- und Nachbetriebsphase abgedeckt sind.

Daher sind bei der Bewertung von mikrobiologischen Vorgängen im geplanten Endlager Konrad vor allem

- die Einflußmöglichkeiten von Mikroorganismen in der Betriebsphase,
- die möglichen Auswirkungen auf die Freisetzung von

Radionukliden aus dem Endlager und ihren Transport durch die Geosphäre in der Nachbetriebsphase,

zu berücksichtigen. Dabei ist es nötig zwischen den Randbedingungen für die Betriebsphase und die Nachbetriebsphase zu unterscheiden. Weiterhin ist es zweckmäßig, für die Nachbetriebsphase den Nah- und Fernbereich um die eingelagerten Abfallgebinde getrennt zu betrachten.

Zum besseren Verständnis der möglichen Aktivität der Mikroorganismen im Endlager werden relevante Faktoren der Abfallbehandlung und -konditionierung sowie der Zwischen- und Endlagerung der Abfallgebinde dargelegt.

## 2. Abfälle und Abfallgebinde

In der Schachtanlage Konrad ist die Endlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vorgesehen. Sie stammen aus

- Wiederaufarbeitungsanlagen
- Kernkraftwerken,
- Landessammelstellen,
- Großforschungseinrichtungen,
- der kerntechnischen Industrie,
- der Stilllegung und Demontage kerntechnischer Anlagen sowie
- sonstiger Herkunft (z. B. Bundeswehr, pharmazeutische Industrie).

Im "Plan - Endlager für radioaktive Abfälle - Schachtanlage Konrad, Salzgitter" (Stand: 9/86) /4/ sind die verschiedenen Abfälle aus den oben genannten Quellen beschrieben; dort sind auch deren Verarbeitung und die Behälter zu ihrer Verpackung angegeben.

Die endzulagernden Abfälle lassen sich folgenden Abfallproduktgruppen zuordnen /4/:

- Bitumen- und Kunststoffprodukte,
- Feststoffe, bei denen brennbare Abfallstoffe mit einem Schmelzpunkt  $< 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  so verarbeitet sein müssen, daß sie bei thermischer Belastung nicht in flüssiger Form aus dem Abfallprodukt austreten,
- metallische Feststoffe,
- Preßlinge aus formstabil kompaktierten Abfällen,
- zementierte/betonierte Abfälle,
- Konzentrate, wobei der radioaktive Abfall aus einem festen Körper besteht und nicht brennbar ist.

Alle Abfallprodukte liegen in fester oder verfestigter Form vor und enthalten weder frei bewegliche Flüssigkeiten, noch setzen sie derartige Flüssigkeiten unter üblichen Lagerungs- und Handhabungsbedingungen frei.

Eine beispielhafte Übersicht über Abfallgebinde, die in dieser Anlage endgelagert werden sollen, ist in den Tab. 1 - 7 aus /4/ wiedergegeben. In dieser Übersicht sind Angaben über die Abfallarten (Rohabfälle), Fixierungsmittel und Abfallbehälter verursachergruppenspezifisch zusammengefaßt.

Die endzulagernden Abfallgebinde enthalten neben vergleichsweise geringen Massen an Radionukliden vor allem große Massen an nicht-radioaktiven Materialien, die z. T. chemotoxische Stoffe in Spuren enthalten oder selbst aus chemotoxischen Stoffen bestehen können /5/. Diese Stoffe können als Bestandteile

- des Abfallbehälters (z. B. Blei von Innenauskleidungen),
- des Fixierungsmittels (z. B. Chromate im Zementstein) und

- des radioaktiven Abfalls (z. B. Cadmium in Steuerstäben und Absorberblechen oder Bleisulfat in Kabelisolationen oder chlorierte Kohlenwasserstoffe in PVC-Folien)

auftreten.



Behälter	Fixierung	Abfallart
Betonbehälter	Zement/Beton	Filterharze, Kieselgel
Container		
Betonbehälter	Zement/Beton	Schwebstofffilter
Betonbehälter	Zement/Beton	Fasermattenfilter, Kerzenfilter, sonstige Filter
Betonbehälter	Zement/Beton	Konzentrate aus Dekontaminations- und Prozeßabwassern
Container		
Betonbehälter	Zement/Beton	Rückstände aus der Verbrennung
Container		
Betonbehälter	Zement/Beton	Schrott
Container		
Container	Zement/Beton	Schrott und paketierte Filter
Betonbehälter	Zement/Beton	Sorptionsmaterial
Container	Zement/Beton	Lösemittel- und Produktfilter
Container	Zement/Beton	Bauschutt, Strahlsand
Container	Zement/Beton	Feste, z. T. brennbare Pu-haltige Abfälle aus der Mischoxidbrennelement-Herstellung

Tab. 1: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente

Behälter	Fixierung	Abfallart
Betonbehälter	organisches Fixierungsmittel	Dekontaminations- und Prozeßabwasser, organische Abfälle
Betonbehälter	Zement/Beton	Kontaminierte Feststoffe
Betonbehälter	Zement/Beton	Plutoniumhaltige Feststoffe

Tab. 2: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken im Ausland

Behälter	Fixierung	Abfallart
Gußbehälter	keine	Kugelharze der Primärkühlmittel- und Brennelementlagerbeckenreinigung
Betonbehälter	organisches Fixierungsmittel	
Gußbehälter	keine	Pulverharze der Primärkühlmittel- und Brennelementlagerbeckenreinigung
Betonbehälter	Zement/Beton	
Gußbehälter	keine	Filterkerzen
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Gußbehälter	keine	Filter- und Verdampferkonzentrate, Filterhilfsmittel
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	Filtermaterialien
Gußbehälter	keine	Meßblanzen
Gußbehälter	keine	Brennelementkästen
Gußbehälter	keine	Steuerelemente
Gußbehälter	keine	Aktivierte, kontaminierte, formbeständige Feststoffe
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Gußbehälter	keine	Veraschte Feststoffe
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Gußbehälter	keine	Z. T. preßbare kontaminierte Feststoffe
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Container	keine	
Container	Zement/Beton	Kleinschrott, Bauschutt, Schlämme und Sand

Tab. 3: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus dem Betrieb von Kernkraftwerken

Behälter	Fixierung	Abfallart
Container	Zement/Beton	Rückstände aus Verbrennung und Pyrolyse
Betonbehälter	Zement/Beton	Abwässer, Konzentrate, Schlämme und Organica
Container	Zement/Beton	
Container	organisches Fixierungsmittel	
Gußbehälter	keine	Strahlenquellen
Gußbehälter	keine	Feste Komponenten, Schrott, Luftfilter, Isoliermaterial, Bauschutt und Erdreich
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Container	keine	
Container	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	Verbrennungsrückstände und Verdampferkonzentrate
Betonbehälter	Zement/Beton	Kontaminierte, aktivierte Feststoffe
Container	keine	

Tab. 4: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus Großforschungseinrichtungen und Landessammelstellen

Behälter	Fixierung	Abfallart
Container	Zement/Beton	Pastöse, fixierbare, U-haltige Abfälle
Container	Zement/Beton	Pastöse, feste, fixierbare Th- und U-haltige Abfälle
Container	keine	Feste, preßbare, z. T. brennbare Abfälle (Th-, U- oder Pu-haltig)
Betonbehälter	Zement/Beton	Feste, fixierbare, z. T. schwer brennbare, Pu-haltige Abfälle
Container	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	Feste, fixierbare, z. T. brennbare Abfälle
Betonbehälter	Zement/Beton	Getrocknete Schlämme
Betonbehälter	Zement/Beton	Sperrige, fixierbare, kompaktierbare, z. T. brennbare Abfälle
Container	Zement/Beton	
Container	keine	Preßbare, kompaktierbare, z. T. brennbare Abfälle

Tab. 5: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus der Industrie des Kernbrennstoffkreislaufs

Behälter	Fixierung	Abfallart
Gußbehälter	keine	Aktiviere, kontaminierte, formbeständige Metallteile aus kernnahen Bereichen
Gußbehälter	keine	Aktiviere, kontaminierte, formbeständige Metallteile
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Container	keine	
Gußbehälter	keine	Aktiviere, kontaminierte Feststoffe
Betonbehälter	Zement/Beton	
Container	Zement/Beton	
Container	keine	
Betonbehälter	Zement/Beton	Dekontaminationsflüssigkeiten und Abfälle aus der Wasserreinigung
Container	Zement/Beton	

Tab. 6: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde aus Stilllegung und Demontage kerntechnischer Anlagen

Behälter	Fixierung	Abfallart
Container	Zement/Beton	Feste, z. T. flüssige, konzentrierbare, z. T. brennbare, preßbare, fixierbare Mischabfälle
Container	Zement/Beton	Strahlenquellen
Container	keine	Feste, z. T. brennbare, z. T. preßbare Abfälle
Container	Zement/Beton	Feste, z. T. schwer brennbare Abfälle, Glasbruch
Container	keine	Chemische-pharmazeutische Abfälle
Container	keine	Fasermattenfilter

Tab. 7: Beispiele für endzulagernde Abfallgebinde sonstiger Herkunft

Die Gesamtaktivität der  $\alpha$ - und  $\beta/\gamma$ -Strahler zu Beginn der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad wurde zu etwa  $8 \cdot 10^{17}$  Bq ( $2,2 \cdot 10^7$  Ci) abgeschätzt. Als Obergrenzen für die zulässige Gesamtaktivität der endlagerbaren radioaktiven Abfälle sind  $5,0 \cdot 10^{19}$  Bq für  $\beta/\gamma$ -Strahler und  $1,0 \cdot 10^{17}$  Bq für  $\alpha$ -Strahler abgeleitet worden /6/.

Der Anteil organischer Materialien an der Gesamtmasse der endzulagernden Abfallgebinde am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad beträgt etwa  $2,3 \cdot 10^4$  Mg (ca. 2 %). Darin sind auch die organisch chemotoxischen Stoffe enthalten (etwa  $2,6 \cdot 10^2$  Mg).

### 3. Vorkommen und Aktivität von Mikroorganismen

Die in der vorliegenden Stellungnahme vornehmlich zu betrachtenden Bereiche Grubengebäude, Nebengestein sowie über- bzw. unterlagernde Schichten (die oberen, zum Quartär und Tertiär gehörenden Schichten werden bereits der Biosphäre zugerechnet und daher hier nicht betrachtet) stellen in mikrobiologischer Hinsicht extreme Lebensräume dar, die nur von Mikroorganismen besiedelt werden können, die an die dort herrschenden Bedingungen angepaßt sind. Im folgenden soll daher eine kurze Charakterisierung der Mikroorganismen vorgenommen sowie auf die für Vorkommen und Aktivität von Mikroorganismen wesentlichen Randbedingungen eingegangen werden.

#### 3.1 Charakterisierung von Mikroorganismen

Bei den Mikroorganismen handelt es sich um niedere Organismen, die aus einzelnen Zellen oder einfachen Zellverbänden bestehen. Hierzu gehören u. a. Bakterien, Pilze, Actinomyceten, Hefen, Protozoen und Algen. Mikroorganismen werden entsprechend den nachstehenden Kriterien charakterisiert:

- Energiequelle
 

Licht	phototroph
Chemische Substanzen	chemotroph
  
- Elektronendonator
 

Organische Verbindungen	organotroph
-------------------------	-------------

Anorganische Verbindungen (z. B. $H_2$ , $NH_3$ , $H_2S$ , $Fe^{2+}$ )	lithotroph
- C-Quelle für Biosynthese	
Organische Verbindungen	hétérotroph
$CO_2$	autotroph
org. Verb. + $CO_2$	mixotroph
- Elektronenakzeptor	
Sauerstoff	aerobe Atmung
anorganische Verbindungen ( $NO_3^-$ , $SO_4^{2-}$ , $CO_2$ , $HOC_3^-$ )	anaerobe Atmung
organische Verbindungen	Gärung (Fermentation)
$CO_2$ + Licht	anaerobe Photosynthese.

Diese Aufstellung zeigt, daß Mikroorganismen unterschiedliche Stoffwechselltypen aufweisen. Es wird aber auch deutlich, daß mikrobielle Aktivitäten Einschränkungen unterliegen können. So schließt z. B. das Fehlen von Licht die Anwesenheit phototropher Organismen aus, während bei Abwesenheit von Sauerstoff auf aerobe Atmung angewiesene Mikroorganismen nicht aktiv sein können.

### 3.2 Wachstumsansprüche von Mikroorganismen

Um die Auswirkungen eventueller mikrobiologischer Vorgänge im Endlager abschätzen zu können, müssen auch die notwendigen Voraussetzungen betrachtet werden. Vorkommen und Ausbreitung von Mikroorganismen hängen im wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt  
Bakterien benötigen Substratwassergehalte von wenigstens ca. 20 %, Pilze mindestens etwa 10 %. Bei trockenem Substrat ist für das Wachstum der meisten Mikroorganismen eine Luftfeuchte von mehr als 80 % erforderlich, mit Ausnahme einiger Pilze, die bei etwa 70 % Luftfeuchtigkeit wachsen.
- Ausreichendes Angebot assimilierbarer Verbindungen  
Lebensnotwendige chemische Elemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium und Eisen müssen in ausreichenden Konzentra-

tionen vorhanden sein. Neben diesen Hauptelementen besteht auch ein Bedarf an Spurenelementen, die in geringer Konzentration benötigt werden wie Zink, Mangan, Molybdän und Selen.

- Energiequellen

Vorhandensein nutzbarer Energiequellen in Form von Licht (phototrophe Organismen) oder Oxidations-Reduktions-Prozessen (chemotrophe Organismen).

- pH- und Eh-Wert des Wassers

Die meisten Bakterien wachsen bevorzugt in einem pH-Bereich von etwa 6 bis 8. Es werden zwar auch Mikroorganismen gefunden, die im stark Sauren (pH-Wert um 1,5) und stark Alkalischen (pH-Wert um 11) noch wachsen, doch ist hervorzuheben, daß es sich hierbei hauptsächlich um phototrophe Mikroorganismen handelt, die an extreme Lebensbedingungen in einem speziellen Biotop angepaßt sind. Bei niedrigen pH-Werten können Metallionen in höheren, toxisch wirkenden Konzentrationen in die Zellen eindringen, organische Säuren werden in protonierter (toxischer) Form aufgenommen. Bei hohem pH dagegen werden viele lebensnotwendige Elemente unlöslich. Toxizität, Mangel an Nährstoffen und Zellinstabilität verhindern das Überleben der meisten Mikroorganismen bei extremen pH-Werten /1/.

Als Beispiele für den Einfluß des Redox-Potentials sind die sulfatreduzierenden Bakterien zu nennen, die zur Korrosion von Metallen beitragen können und nur bei einem Eh-Wert unter -150 mV aktiv sind und die methanbildenden Bakterien, die Eh-Werte unter -200 mV erfordern.

- Anwesenheit von Sauerstoff

Entsprechend ihrer Empfindlichkeit gegenüber Sauerstoff können folgende Typen von Mikroorganismen unterschieden werden:

- obligat aerob: es wird Sauerstoff zur aeroben Atmung benötigt bzw. erfolgt alternativ anaerobe Atmung mit Nitrat. Diese Mikroorganismen sind unfähig zu einem Gärungsstoffwechsel, der unter anaeroben Bedingungen abläuft.
- mikroaerophil: wie oben beschrieben, doch sind diese Mikroor-

ganismen empfindlich gegenüber normalem Sauerstoff-Partialdruck.

- fakultativ anaerob: bei Anwesenheit von Sauerstoff erfolgt aerobe Atmung, bei Sauerstoff-Mangel erfolgt eine Umschaltung auf Gärungsstoffwechsel.
- anaerob: diese Mikroorganismen sind nur zur Gärung bzw. zur anaeroben Atmung mit  $\text{SO}_4^{2-}$  oder  $\text{CO}_2$  befähigt. Es ist noch zu unterscheiden zwischen
  - aerotolerant: nicht empfindlich gegen Sauerstoff
  - obligat anaerob: diese Mikroorganismen sind sauerstoffempfindlich, die Anwesenheit von Sauerstoff führt zur Abtötung der vegetativen Zellen.

#### - Temperatur

Das Wachstumsoptimum der meisten Mikroorganismen liegt im Temperaturbereich von etwa 28 - 37 °C.

#### - Druck

Mikroorganismen können bei erhöhtem Druck im geologischen Untergrund überleben. Durch Druck wird aber z. B. die Geißelbewegung gehemmt, was eine Herabsetzung der Mobilität von Mikroorganismen zur Folge hat.

#### - Strahlung

Mikroorganismen können durch ionisierende Strahlen geschädigt werden, doch ist nicht davon auszugehen, daß bei den in der Schachanlage Konrad zu erwartenden Strahlendosen ein vollständiges Absterben von Mikroorganismen erfolgt.

Während sich die ersten drei der o. g. Faktoren auf alle Arten von Mikroorganismen auf die gleiche Weise auswirken, führen Veränderungen bei den übrigen Faktoren zu einer Selektion. So ist beispielsweise unter anaeroben Bedingungen ein Wachstum von Mikroorganismen, die für ihren Stoffwechsel Sauerstoff benötigen, ausgeschlossen und ionisierende Strahlung führt zur Unterdrückung von strahlungsempfindlichen Organismen.

Bei der Betrachtung der für mikrobielle Aktivitäten erforderli-



chen Randbedingungen ist aber zu berücksichtigen, daß bei den meisten mikrobiologischen Untersuchungen, besonders auch bei den Arbeiten im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, im Labor günstige Wachstumsbedingungen für die jeweils untersuchten Mikroorganismen geschaffen werden, so daß sich ihre Ergebnisse im allgemeinen nur bedingt auf die Situation in einem Endlager im tiefen geologischen Untergrund übertragen lassen. So müssen Mikroorganismen, die unter Laborbedingungen befriedigendes Wachstum zeigen, unter Endlagerbedingungen, die wesentlich ungünstiger sind, Abfallgebinde bzw. aus Abfallgebinden freigesetzte Radionuklide nicht unbedingt beeinflussen.

Aus den vorhergehenden Abschnitten wird deutlich, daß Wachstum und Stoffwechselftigkeit von Mikroorganismen sehr stark von den jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen abhängig sind.

#### **4. Mikrobielle Aspekte bei der Herstellung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfallprodukte**

Es werden nur Abfallprodukte betrachtet, die den in Kap. 2 aufgeführten Abfallproduktgruppen zugeordnet werden können und als radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in der Schachanlage Konrad eingelagert werden sollen.

Die Konditionierung, d. h. die Überführung von Rohabfällen durch Verarbeitung und Verpackung in zur Endlagerung geeignete Behälter ist für radioaktive Abfälle unabdingbar. Ein Großteil der Abfälle wird durch Einbetten in Zement, Beton, Bitumen oder Kunststoff konditioniert und in für die Zwischen- und Endlagerung geeigneten Behältern aus Stahlblech, Beton oder Gußeisen bzw. Kombinationen der genannten Behälterwerkstoffe verpackt. Die verschiedenen Behälter müssen je nach Lagergut Dichtheitsanforderungen genügen, so daß ein Eindringen von Mikroorganismen in die Abfallprodukte bei Behältern mit spezifizierter Dichtigkeit während der Zwischenlagerung (und auch in der Betriebsphase) des Endlagers kaum zu erwarten ist.

Die Mehrzahl der Konditionierungsverfahren läuft unter Bedingungen ab, die als äußerst lebensfeindlich für Mikroorganismen einzustufen sind. Bei der Zementierung beispielsweise werden zum

einen pH-Werte um 12 erreicht, zum anderen treten beim Abbinden hohe Temperaturen (bis ca. 100 °C) auf. Von daher sind mikrobielle Aktivitäten in zementierten Abfallprodukten nicht zu erwarten.

Die Bituminierung radioaktiver Abfälle erfolgt bei lebensfeindlichen Temperaturen von > 120 - 200 °C. Außerdem enthalten Bitumenprodukte herstellungsbedingt praktisch kein Wasser. Es ist also davon auszugehen, daß Bitumenprodukte keinem signifikanten Angriff von Mikroorganismen unter Zwischenlagerbedingungen unterliegen.

In westeuropäischen Ländern allein wurden bisher mehrere Zehntausend Fässer mit bituminierten radioaktiven Abfällen erzeugt, wovon ein Großteil schon über zehn Jahre zwischengelagert wird. Bei dieser Zwischenlagerung sind keine Radionuklidfreisetzungen, Korrosion von Behältern oder andere schädliche Befunde wahrgenommen worden, die auf mikrobiologische Vorgänge zurückzuführen wären. Bitumierte Abfälle, die in der Schachtanlage Konrad endgelagert werden sollen, fallen bei der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente aus deutschen Kernkraftwerken in Frankreich an.

Derzeit werden in der Bundesrepublik keine bituminierten radioaktiven Abfälle erzeugt.

Als weiteres Beispiel sind Verdampferkonzentrate zu betrachten. Im Falle einer Fixierung in Zement bzw. Beton gelten die oben aufgeführten Argumente für entsprechende Abfallprodukte. Unfixierte Konzentrate in fester Form werden durch Eindampfen wäßriger Lösungen erhalten. Herstellungstemperaturen oberhalb des für Mikroorganismen günstigen Bereichs, geringe Gehalte verfügbaren Wassers und der Salzgehalt der Produkte verhindern oder schränken ebenfalls die Aktivität von Mikroorganismen ein.

Dagegen können in kompaktierten Abfällen, die organische Materialien enthalten und in Abfallgebinden mit unfixierten Ionenaustauscherharzen mikrobielle Prozesse nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Voraussetzung ist allerdings ein Substratwassergehalt von mindestens 10 % und das Vorhandensein nutzbarer Energiequellen (Kap. 3.2), so daß nur in derartigen Abfallpro-

dukten in eingeschränktem Maße mikrobielle Vorgänge zu erwarten sind.

Unabhängig davon muß berücksichtigt werden, daß vor einer Endlagerung eine Überprüfung der Abfallgebinde auf Einhaltung der Endlagerungsbedingungen (z. B. durch Stichprobenprüfung an bereits hergestellten Abfallgebänden, den sogenannten Altabfällen oder durch die Verfahrensqualifikation der Abfallkonditionierung) durchgeführt wird.

Es ist also davon auszugehen, daß mikrobielle Einflüsse während einer Zwischenlagerung keine Auswirkungen auf die Endlagerbarkeit von Abfallgebänden haben.

Sollte wider Erwarten eine massive Mikroorganismen-Entwicklung an oder in gelagerten Abfallgebänden wahrgenommen werden, so stehen genügend Maßnahmen (z. B. Zugabe desinfizierender Substanzen) zur Beseitigung der Mikroorganismen und Verhinderung einer erneuten Aktivität zur Verfügung.

##### 5. Mögliche Auswirkungen von Mikroorganismen in der Betriebsphase des Endlagers Konrad

Da weder die Abfallprodukte, noch die Verpackungen und Handhabungseinrichtungen, noch die aufgefahrenen Hohlräume steril sind, muß angenommen werden, daß Mikroorganismen in der Betriebsphase in das Endlager Konrad eingebracht werden. Vergleicht man die in Kap. 2.2 angesprochenen Wachstumsfaktoren mit den zu erwartenden Randbedingungen im geplanten Endlager Schachtanlage Konrad, so sind die Trockenheit und das geringe Nährstoffangebot im Grubengebäude als wesentliche wachstumshemmende Parameter in der Betriebsphase anzusehen. Der erhöhte Strahlenpegel stellt einen weiteren wachstumsbegrenzenden Faktor dar.

Wie bei der Zwischenlagerung, für die ähnliche Bedingungen gelten, ist in der Betriebsphase ein mikrobieller Einfluß daher nur in Abfallgebänden zu diskutieren, die organische Abfälle bzw. organische Fixierungsmittel und einen ausreichend großen Restfeuchteanteil enthalten.

Von den mit dem Stoffwechsel von Mikroorganismen verbundenen Prozessen sind in diesen Abfallgebinden für die Betriebsphase nur die Bildung von Gasen und die damit verbundenen Auswirkungen zu betrachten.

Dabei wirkt sich die unter aeroben Bedingungen mögliche Bildung von Sauerstoff und Kohlendioxid sowie die unter anaeroben Bedingungen mögliche Bildung von Wasserstoff und Methan - auch unter Berücksichtigung der Bildungs- und Freisetzungsraten - durch Mikroorganismen nicht störend auf die der Bewetterung unterliegende Atmosphäre im Grubengebäude aus. Beim mikrobiellen Abbau organischer Substanzen sind nur die Gase von radiologischer Bedeutung, die H 3 oder C 14 enthalten, d. h. Wasserstoff, Methan und Kohlendioxid. Diese Gase können mit tritiiertem Wasser und geringen Mengen flüchtiger Radionuklide wie Radon-222 und Jod 129 aus den Abfallgebinden entweichen, die während des bestimmungsgemäßen Betriebes von den Wettern aus der Schachtanlage abgeführt werden und somit nur geringfügig zur Inhalationsdosis derjenigen Personen beitragen, die sich in diesen Wettern aufhalten. Die mikrobiell bedingte Bildung von Wasserstoff und Methan tritt aufgrund des begrenzten Angebots an Nährstoffen und Energiequellen sowie des geringen Restfeuchtegehalts zurück gegenüber der Gasbildung z. B. durch Radiolyse und durch eine Korrosion der Behältermaterialien.

Weiterhin ist davon auszugehen, daß auch in abgeworfenen Kammern die Gasbildung durch Mikroorganismen in den Abfallgebinden gegenüber der Gasbildung z. B. durch Radiolyse oder durch Korrosion von Behälterwerkstoffen zurücktritt. Daher sind die radiologischen Auswirkungen einer mikrobiell induzierten Freisetzung von Radionukliden aus Abfallgebinden als abgedeckt anzusehen durch die standortspezifischen Sicherheitsanalysen zum Normalbetrieb und zu Störfällen. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, daß bei der Fortschreibung der "Vorläufigen Endlagerungsbedingungen", Stand 9/86 /7/ eine aus Sicherheitsanalysen für den bestimmungsgemäßen Betrieb abgeleitete Begrenzung der zulässigen Gasbildungsrate im Abfallprodukt vorgenommen wird. Die Einhaltung dieser Anforderung wird durch Produktkontrollmaßnahmen (z. B. Stichprobenprüfung bei Altabfällen, Verfahrensqualifikation bei der Abfallkonditionierung) gewährleistet. Damit ist sicherge-

stellt, daß mikrobiell bedingte Gasbildung - die nach den o. g. Argumenten nur bei einem Teil der Abfallgebinde in sehr eingeschränktem Maße auftreten kann - die Sicherheit des Endlagers Konrad in der Betriebsphase nicht beeinträchtigen kann.

## 6. Mögliche Auswirkungen in der Nachbetriebsphase des Endlagers Konrad

Während in der Betriebsphase des geplanten Endlagers Konrad aufgrund der Trockenheit mikrobielle Aktivitäten im wesentlichen nur in Abfallgebänden mit organischen Abfällen und ausreichendem Substratwassergehalt zu diskutieren sind, ist für die Nachbetriebsphase von anderen Voraussetzungen auszugehen. Der Übergang von der Betriebs- zur Nachbetriebsphase ist mit einer langsam ablaufenden, aber drastischen Veränderung der Randbedingungen verbunden, die die Existenz und das Wachstum von Mikroorganismen beeinflussen. Dies wirkt sich auf eventuell natürlich vorkommende und eingeschleppte Organismen in gleicher Weise aus.

Geht man - wie in den Analysen zur Langzeitsicherheit des Endlagers Konrad unterstellt - davon aus, daß das Grubengebäude durch Formationswasser aus dem Oxford aufgefüllt wird, so verbessern sich dadurch zwar die Entwicklungsmöglichkeiten für Mikroorganismen aber gleichzeitig werden durch die Salinität der zutretenden Wässer und die starke Verschiebung der Eh- und pH-Werte Verschlechterungen der Entwicklungsmöglichkeiten bedingt. Nachfolgend wird dargestellt, daß es unter den Bedingungen der Nachbetriebsphase durch Mikroorganismen nicht zu Auswirkungen kommt, die die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen können. Wegen der Verschiedenheit der zu beachtenden Gesichtspunkte werden die Vorgänge im Grubengebäude (Nahfeld) und im Nebengestein einschließlich der über- und unterlagernden Schichten getrennt bewertet.

### 6.1 Mögliche Auswirkungen im Nahbereich

#### 6.1.1 Randbedingungen im Grubengebäude zu Beginn der Nachbetriebsphase

Der Beginn der Nachbetriebsphase ist zunächst einmal durch den

Wegfall der Beleuchtung gekennzeichnet, was zum Absterben phototroper Bakterien, Pilze und Algen führt. Es können daher nur noch chemolithotrophe Organismen existieren, die in Abwesenheit von Licht die Energie chemischer Reaktionen zum Aufbau von organischer Substanz nutzen. Bereits an dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, daß dadurch ein großer Teil der Gruppe der extrem salztoleranten Mikroorganismen ausgeschlossen werden kann, da es sich hierbei um phototrophe Organismen handelt.

Weiterhin ist mit einem raschen Abbau von Sauerstoff durch Korrosionsprozesse zu rechnen, so daß sich relativ schnell anaerobe, reduzierende Bedingungen einstellen werden. Dadurch wird die Aktivität eingebrachter aerober Mikroorganismen stark eingeschränkt. Experimentelle Untersuchungen /8/ unter für die Nachbetriebsphase charakteristischen Randbedingungen (flüssige Phase: Formationswasser Korallenoolith, sorbierende Phase: Versatzmaterial und Beton zur Berücksichtigung der Zement/Beton enthaltenden Abfallgebände) bestätigen das Absinken des Eh-Wertes unter diesen Bedingungen. Weiterhin zeigen diese Experimente das erwartete Einstellen hoher pH-Werte um 11 - 12.

Wie z. B. in /9/ gezeigt, stellen die für die Endlagerformation charakteristischen Tiefenwässer etwa halbgesättigte NaCl-Lösungen dar; sie sind damit zumindestens als bakteriostatisch, möglicherweise sogar als bakterizid einzustufen. Einleitend wurde bereits darauf hingewiesen, daß ein großer Teil der salztoleranten oder salzbevorzugenden Mikroorganismen nur bei Anwesenheit von Licht existieren kann. Auf die selektionierende Wirkung ionisierender Strahlung wurde ebenfalls bereits hingewiesen. Medien mit mehr als 30 % Salzgehalt stellen für z. B. sulfatreduzierende Bakterien, deren möglicher Einfluß auf die Freisetzung von Radionukliden aus Abfallgebänden wegen ihrer korrosiven Wirkung auf Eisen diskutiert wird, sehr lebensfeindliche Milieus dar.

Wie die Daten in /9/ zeigen, handelt es sich bei den Konrad-Tiefenwässern um nährstoffarme, nur geringe Mengen von für Mikroorganismen nutzbaren Elektronenakzeptoren wie Nitrat und Sulfat enthaltene Medien. Zusammen mit dem aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten der Tiefenwässer /10/ geringen Zufluß ins Grubengebäude ist somit von einer starken Limitierung der Zufuhr

von Nahrungs- und Energiequellen im Grubengebäude der Schachtanlage Konrad auszugehen.

#### 6.1.2 Bewertung mikrobieller Vorgänge im Nahfeld

Vor dem Hintergrund der in Kap. 3 kurz zusammengefaßten Faktoren für Vorkommen und Wachstum von Mikroorganismen sind aufgrund der sich einstellenden Bedingungen (Kap. 6.1.1) im Grubengebäude der Schachtanlage Konrad in der Nachbetriebsphase, nämlich

- Dunkelheit (die nur chemolithotrophe Organismen zuläßt)
- anaerobe, reduzierende Bedingungen
- pH-Werte um 12
- Mangel an Nährstoffen und nutzbaren Elektronenakzeptoren
- ionisierende Strahlung

keine nennenswerten mikrobiellen Aktivitäten zu erwarten.

Sollten wider Erwarten aktive Mikroorganismenpopulationen vorhanden sein, so sind die möglichen Auswirkungen der Mikroorganismen durch die Annahmen abgedeckt, die der Bewertung der Langzeitsicherheit der Schachtanlage Konrad zugrunde liegen.

In den Sicherheitsanalysen für die Nachbetriebsphase wird konservativ kein Kredit genommen von Standzeiten für Behälter für radioaktive Abfälle. Insofern kommt einer möglichen Korrosion der Behältermaterialien durch Mikroorganismen keinerlei radiologische Bedeutung zu. Im übrigen würde die chemische Korrosion unter den Bedingungen im Grubengebäude gegenüber der anaeroben mikrobiellen Korrosion, die einen langsam ablaufenden Prozeß darstellt und durch das Vorkommen von Elektronenakzeptoren limitiert wird /1/ überwiegen.

Darüber hinaus sind die in den Sicherheitsanalysen unterstellten Zeiten für die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfallprodukten um mehrere Größenordnungen kleiner als die errechneten

Transportzeiten in die Biosphäre. Selbst wenn sie durch mikrobielle Einwirkungen verkürzt würden, hätte dieses keine Bedeutung für die errechnete Strahlenbelastung in der Biosphäre.

Eine zu berücksichtigende Änderung des chemischen Milieus durch Mikroorganismen mit Auswirkungen auf die freigesetzten Radionuklide kann ausgeschlossen werden. Zum einen werden die physikalisch-chemischen Parameter im System Versatzmaterial/Auflockerungszone des Einlagerungshorizontes/Formationswasser Korallenoolith/zement/betonhaltige Abfallgebäude hauptsächlich von der chemischen Zusammensetzung des Wassers und den Eigenschaften der in großem Überschuß vorhandenen festen Phasen bestimmt. Zum anderen sind, wie vorhergehend begründet, unter den Bedingungen der Nachbetriebsphase im Grubengebäude keine nennenswerten mikrobiellen Aktivitäten zu erwarten. Hinzu kommt, daß die für das Grubengebäude angesetzten Sorptionsdaten der Radionuklide die unterstellte Anwesenheit des starken Komplexbildners EDTA (Ethylen-Diammin-Tetra-Acetat) berücksichtigen /11/. Ein in der Literatur beschriebener /1/ möglicher Aufbau von komplexierend wirkenden Substanzen aus organischen Materialien durch Mikroorganismen wird dadurch berücksichtigt. Die Sorptionsdaten sind somit auch aus mikrobiologischer Sicht als abdeckend anzusehen.

Ein weiterer, auch im Hinblick auf die nachfolgende Bewertung für das Deckgebirge wesentlicher Gesichtspunkt ergibt sich aus einer Betrachtung der Konzentrationsverhältnisse. Tab. 8 enthält die sich im Grubengebäude einstellenden maximalen Elementkonzentrationen, Tab. 9 die Konzentrationen der übrigen Wasserinhaltsstoffe des Formationswassers. Ein Vergleich der Daten zeigt, daß die Konzentrationen der meisten inaktiven Wasserinhaltsstoffe um Größenordnungen über der der relevanten Radionuklide wie Tc, Np und Pu liegt.

Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung von Mikroorganismen, sofern überhaupt vorhanden, mit nicht radioaktiven Nukliden wie z. B. Natrium, Calcium oder Eisen ist entsprechend höher als die einer Wechselwirkung mit den geringen Mengen an Radionukliden.

Das bedeutet, daß die Aufnahmefähigkeit der Mikroorganismen für Radionuklide durch die im sehr großen Überschuß vorhandenen Me-



talle, die um die gleichen Bindungsstellen konkurrieren, stark herabgesetzt wird und somit kaum zu einer beschleunigten Radionuklidfreisetzung und -ausbreitung beitragen kann. Darüber hinaus sind die beträchtlichen Massen von Schwermetallen und anderen anorganischen Elementen im gesamten Abfallgebundevolumen zu berücksichtigen, die ebenfalls mit den Radionukliden konkurrieren. Nach /5/ beträgt der Anteil anorganischer Materialien an der Gesamtmasse der endzulagernden Abfallgebunde am Ende der Betriebsphase etwa  $1,3 \cdot 10^6$  Mg (ca. 98 %). Die Massen dieser chemotoxischen Elemente im betrachteten Abfallgebundevolumen von etwa 500 000 m<sup>3</sup> sind in Tab. 10 kumuliert wiedergegeben. Hierin sind auch die Massen inaktiver, stabiler Zerfallsprodukte wie Blei oder Wismut enthalten. Die Toxizität dieser Elemente stellt einen weiteren, das Wachstum der Organismen begrenzenden Faktor dar.

Element	Element-Konzentration (Mol/l)	Element	Element-Konzentration (Mol/l)
Tc	5,7E-07	Pu	5,3E-06
Se	8,4E-09	Am/Cm	3,1E-08
Zr	8,0E-07	Pb	2,3E+08
Nb	3,9E-11	U	3,1E-03
Cs	1,2E-06	Ra	2,3E-11
J	5,3E-05	Ni	3,1E-04
C	4,8E-08	Th	3,3E-04
Sr	2,6E-07	Pa	5,7E-11
Np	3,9E-08	Ac	3,7E-14

Tab. 8 : Elementkonzentrationen im Grubengebäude

Bestandteil	Konzentration (mg/l)	Bestandteil	Konzentration (mg/l)
CO <sub>2</sub> frei	265	Mn <sup>2+</sup>	-
Li <sup>+</sup>	1,2	F <sup>-</sup>	331
Na <sup>+</sup>	62 000	Cl <sup>-</sup>	117 327
K <sup>+</sup>	214	Br <sup>-</sup>	653
Cs <sup>+</sup>	0,005	I <sup>-</sup>	63,5
Mg <sup>+</sup>	2720	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	60,4
Ca <sup>+</sup>	13 200	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	600
Sr <sup>+</sup>	438	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-
Ba <sup>+</sup>	0,053	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	53,4
Fe <sup>2+/3+</sup>	57	NO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	-
Al <sup>3+</sup>	0,021	SiO <sub>2</sub>	5,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	51,2		

Tab. 9 : Analysenergebnisse für Formationswasser aus dem Korallenoolith

Element	kumulierte Masse in ca. 500 000 m <sup>3</sup> Abfallgebindevolumen [Mg]
Ag	64,32
As	0,219
Be	0,015
Bi	23,75
Cd	105,20
Co	74,93
Cr	2 185,00
Cu	1 765,00
Hg	0,059
Mo	98,79
Ni	5 350,00
Pb	21 720,00
Sb	19,10
Se	0,032
Te	0,021
Th	31,24
Tl	0,043
U	113,40
V	1 113,00
Zn	379,60

Tab. 10: Kumulierte Masse von anorganischen chemotoxischen Elementen in ca. 500 000 m<sup>3</sup> Abfallgebindevolumen

## 6.2 Mögliche Auswirkungen im Fernbereich

### 6.2.1 Randbedingungen längs des Wasserpfads

Neben den Effekten im Grubengebäude sind auch mögliche Einflüsse von Mikroorganismen auf die Ausbreitung von Radionukliden auf dem Wasserpfad durch das Deckgebirge zu diskutieren. In Richtung auf die Erdoberfläche finden Mikroorganismen in vielen Fällen zunehmend günstigere Bedingungen vor, z. B. hinsichtlich

- pH-Wert
- Temperatur und Druck
- Salzgehalt der Wässer
- Sauerstoffangebot
- Verfügbarkeit von
  - . Energiequellen
  - . Elektronenakzeptoren

so daß bei ausreichendem Nahrungsangebot das Vorhandensein von Mikroorganismen unterstellt werden muß. Aber auch für den Wasserpfad ist davon auszugehen, daß die Aufnahmefähigkeit der Mikroorganismen für Radionuklide durch die in sehr großem Überschuß vorhandenen inaktiven Wasserinhaltsstoffe stark herabgesetzt wird. Die geänderten Bedingungen im Deckgebirge können aber auch die Aktivität von Mikroorganismen mit bestimmten Stoffwechseltypen einschränken. So erfolgt eine mikrobielle Reduktion von Sulfat nur unter obligat anaeroben Bedingungen bei Eh-Werten von unter  $-150$  mV, so daß in den meisten Grundwässern kaum mit einer Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien gerechnet werden muß. Ebenso erscheint eine Aktivität von methanbildenden Bakterien ausgeschlossen, da hierzu Eh-Werte von weniger als  $-200$  mV vorliegen müssen.

### 6.2.2 Bewertung mikrobieller Vorgänge im Fernbereich

Mikroorganismen könnten z. B. durch Änderung des Oxidationszustands eine Erhöhung der Löslichkeit von Radionukliden bewirken oder die Mobilität der Radionuklide verändern. Einer Erhöhung von Löslichkeiten kommt aber im Deckgebirge keine Bedeutung zu, da die Konzentration der Radionuklide durch Verdünnung, Dispersion

und Diffusion bereits auf Werte unterhalb von Löslichkeitsbegrenzungen abgesunken ist.

Der Abbau von Komplexbildnern durch Mikroorganismen führt zu einer Festlegung der Radionuklide.

Weiterhin ist zu beachten, daß die in natürlichen Systemen vorgefundenen Mikroorganismen häufig am Sediment (Ausbildung eines Biofilms) haften, wodurch sich eine Retardationswirkung auf evtl. aufgenommene Nuklide ergeben würde.

Wie bereits angesprochen, ist wegen der Konkurrenz zwischen den im großen Überschuß vorliegenden Wasserinhaltsstoffen und den nur in sehr geringen Konzentrationen vorhandenen Radionukliden keine nennenswerte Auswirkung der Mikroorganismen auf den Transport von Radionukliden zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, daß Mikroorganismen sich i. a. langsamer als das Grundwasser (50 - 100 % der Grundwasserfließgeschwindigkeit) fortbewegen, so daß Radionuklide auf gar keinen Fall schneller in die Biosphäre gelangen können, als es den berechneten Grundwasserlaufzeiten entspricht.

Aber auch im Fall, daß bewegliche Organismen zu unterstellen sind, wird deren Ausbreitung eingeschränkt durch Adsorption an Gesteinsoberflächen und vor allem durch die Filtrationswirkung natürlicher Sedimente, ein Effekt, der z. B. aus der Wasseraufbereitung und -gewinnung aus Brunnen bekannt ist. Wenn man die Größe von Bakterien (Durchmesser etwa 0,2 - 5 µm) in Betracht zieht, ist eine Filterwirkung unterhalb der Korngröße von grobem Lehm zu erwarten. Tonige Sedimente sind gute Filter für Bakterien. Neben der Filtration kommt es auch zu einer Ablagerung von Bakterien in den Poren.

Wie Vorkommen und Verbreitung der natürlichen Radioelemente und der chemischen Elemente, deren radioaktive Isotope in den endzulagernden Abfällen enthalten sind, in geologischen Formationen und insbesondere die Existenz von Lagerstätten zeigen, bestimmen im geologischen Untergrund chemische und physikalische Prozesse und nicht mikrobielle Aktivitäten das Verhalten der Elemente.

Das Sorptionsverhalten von Radionukliden in den natürlichen Sedi-ment/Grundwasser-Systemen sowie die möglichen Einflußparameter sind in umfangreichen experimentellen Untersuchungen, die in /11/ beschrieben sind, identifiziert und ihr Einfluß ist quantifiziert worden. In diesen Experimenten, die mit nichtsterilen, natürlichen Proben unter nichtsterilen Bedingungen durchgeführt wurden und die häufig ein Jahr und länger dauerten, ist ein Einfluß von Mikroorganismen implizit enthalten. Dabei hat sich gezeigt, daß das Sorptionsverhalten je nach Radionuklid stark von pH-Wert, Redoxpotential, chemischer Zusammensetzung und Komplexbildner-Konzentrationen in den Wässern abhängen kann. So wird z. B. die Sorption der Aktinidenelemente vermindert, wenn die Wässer komplexierend wirkende Stoffe wie EDTA enthalten. Eine mikrobiell bedingte Abnahme der Sorption wurde in diesen Experimenten nicht gefunden. Es ergaben sich auch keine Hinweise auf mikrobiell verursachte Löslichkeitserhöhungen.

Lediglich beim Jod wurde in einigen Fällen eine durch Mikroorganismen hervorgerufene Fixierung festgestellt /12/, für die es auch beim Technetium einige Hinweise gibt. Derartige, offensichtlich durch Mikroorganismen bedingte Sorptionswirkungen sowie auch der Abbau von Komplexbildnern durch Mikroorganismen sind in den Berechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern nicht berücksichtigt worden. Als Ergebnis von Untersuchungen zum Einfluß der Gammabestrahlung verschiedener Bodenproben auf die Sorption von relevanten Radionukliden wird ein Einfluß von Mikroorganismen auf die Sorption außer im Fall von Jod (s. o.) als unwahrscheinlich angesehen /13/.

## 7. Schlußfolgerungen

Es ist das wesentliche Schutzziel eines Endlagers für radioaktive Abfälle, die Freisetzung der dort eingebrachten Radionuklide und deren Ausbreitung bis hin zur Biosphäre der Menschen so zu verzögern, daß von ihm keine gesundheitsschädlichen Mengen der freigesetzten Radionuklide inkorporiert werden können. In diesem Zusammenhang wurde hier die Frage erörtert, ob mikrobiologische Vorgänge das Erreichen des genannten Schutzziels gefährden können und ob eine Mikroorganismen-Tätigkeit schon während der Zwischenlagerung von Abfallbinden und der anschließenden Einlagerung in

die offenen Lagerstrecken ein Sicherheitsrisiko darstellen.

Unter Berücksichtigung der erforderlichen Bedingungen für ein Mikroorganismen-Wachstum, der bestehenden Bedingungen in der Schachanlage Konrad, der Ergebnisse relevanter experimenteller Untersuchungen und theoretischer Überlegungen kann festgestellt werden, daß der Einfluß von Mikroorganismen - sowohl in ihren negativen als auch in ihren positiven Auswirkungen - vernachlässigbar gering ausfallen wird im Vergleich zu den physikalischen und chemischen Vorgängen, die die Freisetzung von Radionukliden aus dem Zwischen- und Endlager und deren Ausbreitung in der Geosphäre bewirken. Obwohl nach derzeitigem Wissensstand die Anwesenheit von Mikroorganismen kein radiologisches Sicherheitsrisiko für das gesamte Endlagersystem darstellt, sollten zur weiteren Absicherung dieser Bewertung die Ergebnisse der in mehreren Ländern laufenden und geplanten Untersuchungen zu mikrobiellen Vorgängen auf ihre Bedeutung für das Endlager Konrad sorgfältig geprüft werden.

## 8. Literaturverzeichnis

- /1/ H. J. Kutzner, D. Herrmann: "Untersuchungen zum möglichen Einfluß von Mikroorganismen auf die Ausbreitung von Radionukliden aus Endlagern", Literaturstudie im Auftrag des BMFT, März 1989
- /2/ "The Effects of Natural Organic Compounds and of Microorganisms on Radionuclide Transport", Proceedings of an NEA Workshop Held in Paris on 12th June 1985, OECD-NEA-Bericht RWM-6
- /3/ H. J. Kutzner, D. Dengler: "Wahrscheinlichkeit einer mikrobiellen Aktivität in organischen Abfällen bei deren Lagerung in der Deponie "Grube Konrad" und Möglichkeiten zu ihrer Verhinderung", Studie im Auftrag von NUKEM GmbH, Hanau, 1984
- /4/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt: "Plan - Endlager für radioaktive Abfälle - Schachanlage Konrad, Salzgitter" (Stand: 9/86), Braunschweig, September 1986
- /5/ E. Warnecke, P. Brennecke, B. Buchheim: "Plausibilitätsbetrachtung zur Chemotoxizität radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung", interner Arbeitsbericht PTB-SE-IB-45, Braunschweig, Januar 1989 (erl. Unterlage lfd. Nr. 251)
- /6/ H. P. Berg, D. Ehrlich, H. Illi: "Ableitung einer Gesamtktivität für  $\alpha$ - und  $\beta/\gamma$ -Strahler sowie für einzelne relevante Radionuklide aus den Sicherheitsanalysen zum geplanten Endlager Konrad", PTB-Bericht SE-IB-40, Braunschweig, Oktober 1988
- /7/ P. Brennecke, E. Warnecke: "Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (vorläufige Endlagerungsbedingungen, Stand November 1986) - Schachanlage Konrad - ", PTB-Bericht SE-16, Braunschweig, Januar 1987
- /8/ J. I. Kim, F. Dienstbach, M. Hämmerle: "Eh/pH-Messungen und Sorptionsuntersuchungen von Np, Pu und Tc an zementhaltigen



- geologischen Proben im Grubengebäude Konrad", Bericht der TU München RCM 00387, München, Februar 1987, (erl. Unterlage lfd. Nr. 137.1)
- /9/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Institut für Tieflagerung: "Hydrochemische Untersuchungen und Altersdatierungen an tiefen Grundwässern aus dem Nahbereich der Schachtanlage Konrad" (AP-Nr. 7 zum Auftrag "Chemismus tiefer Grundwässer"), Braunschweig, März 1986
- /10/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Institut für Tieflagerung: "Langzeitsicherheitsanalyse des Endlagers Konrad: Radionuklid Ausbreitung in der Nachbetriebsphase", Juni 1986 (erl. Unterlage lfd. Nr. 76.1)
- /11/ G. Tittel, A. Hollmann, G. Stier-Friedland, E. Warnecke: "Ableitung von Sorptionsdaten aus experimentellen Untersuchungen - Schachtanlage Konrad - ", interner Arbeitsbericht PTB-SE-IB-7, Braunschweig, November 1986, (erl. Unterlage lfd. Nr. 113.4)
- /12/ H. Behrens: "New Insights into the Behaviour of Radioiodine in Aquatic Environments, Report GSF R 313, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, München 1982
- /13/ K. Bunzl, W. Schimmack: "Effect of Microbial Biomass Reduction by Gamma-Irradiation on the Sorption of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{139}\text{Ce}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{95\text{m}}\text{Tc}$  and  $^{131}\text{I}$  by Soils", Radiat. Environ. Biophys. 27, 165-176, 1988